

特性曲線法に基づくコーン支持力の理論的解析 と強度定数 c , ϕ 推定法の提案

小林 泰三¹・深川 良一²・松浦 敦³

¹学生会員 立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

²正会員 工博 立命館大学 理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

³(株)CRCソリューションズ (〒136-8581 東京都江東区南砂町 2-7-5)

特性曲線法を用いた静的コーン貫入試験の貫入メカニズム解析は、コーン表面を rough か smooth の2通りのみで評価していることが多く、また、ほとんどの場合、軸対称条件下における Haar-Von Kármán の仮定を採用している。本研究ではそれらの仮定の貫入抵抗算定値に及ぼす影響が極めて大きいことを指摘するとともに適用性を再検討し、より妥当性の高いコーン貫入理論を力学的、数学的に明瞭な形で定式化した。また、本論文では理論解析の応用として、粘着力 c とせん断抵抗角 ϕ の両者を有する地盤の表層を想定し、異なる先端角を有するコーン(例えば 30° と 60°)を貫入することによって得られる2つの実測抵抗値から路床などの土構造物表層部における c と ϕ を同時に推定するためのアイデアを提案した。

Key Words : cone penetration test, bearing capacity, cone resistance, plastic deformation, strength parameters, method of characteristics

1. まえがき

コーン貫入試験(略称 CPT)の適用は、地盤の地層区分ならびに土質判別、地盤定数の評価、基礎の設計、地盤改良のモニタリング、液状化判定など広い範囲に及んでいる。実務への適用の手段を大別すると、実測されたデータを杭の支持力や浅基礎の沈下等に直接対応させる方法と、一旦、地盤定数などの設計パラメータに変換の上、個々の課題に適用する方法の2通りが考えられる。後者の間接的な方法に関して、コーン抵抗値から地盤の強度定数を推定することはその代表的な適用例である。この問題に関する研究はこれまでも多く進められてきたが、一般に砂質地盤(ϕ 材)、粘性土地盤(c 材)といったように対象地盤を単純化して評価することが多い。例えば砂質地盤に対しては、 ϕ' (あるいは ϕ_d)とコーン先端抵抗との関係を明らかにする研究が多く、一方、粘土地盤に対しては、非排水せん断強度 c_u と先端抵抗との相関に関する研究が多い。したがって、粘着力とせん断抵抗角の両者を有する c - ϕ 材に対する適用性は低く、標準貫入試験もしくは一軸圧縮試験を地盤調査の主体とする我が国において、CPTによる強度定数の推定値は、あくまで N 値や一軸圧縮

試験による圧縮強さ q_u を補完するインデックスとして認識されてきたのが実状と考えられる。

本文では、 c と ϕ の両者を有する地盤を想定し、特性曲線法を用いて強度定数と貫入抵抗力との関係を理論的に明らかにした。また、理論解析の応用例として、異なる先端角を有するコーン(例えば 30° コーンと 60° コーン)を貫入することによって得られる2つの実測抵抗値から路床などの土構造物の表層における c と ϕ を同時に推定するためのアイデアを提案した。ただし、本論文ではコーン貫入時において排水条件が満たされる場合、 c と ϕ は有効応力表示による c' と ϕ' (あるいは c_d , ϕ_d) を意味し、また非排水条件が満たされる場合、全応力表示による強度定数 c_u と ϕ_u を意味するものと考え、ダッシュや沿え字による区別は表記上行なわないことにする。

2. コーン貫入機構の理論的解析

(1) 貫入理論の概説

昨今、コーン貫入メカニズム解析への適用として、有限要素法や空洞拡張理論をはじめとする比較的新しい解析手法による研究が盛んである。一方、剛壁

性問題の古典的解析である支持力理論は、コーンの貫入抵抗解析に最も早く適用されたもののひとつであり、貫入抵抗を杭や深い円形基礎下の土の破壊荷重に等価する手法である。支持力理論では、土の変形特性や圧縮性を考慮できない反面、理論体系が比較的簡単で、コーン支持力を土の c と ϕ で記述できることから強度定数の推定に関する理論的研究には多く用いられてきた。

解析は対象地盤を Mohr-Coulomb の破壊規準に従う剛塑性体と考え、3次元軸対称条件下に拡張した特性曲線法(すべり線場の理論)を用いて行った。特性曲線法は破壊規準と土中の応力釣合い式を組み合わせ得られる一組の微分方程式(Kötter 式)を解くことによって解析するものである。これまで、CPTを対象としているいくつかの研究例^{1),2),3)}があるが、コーン表面粗度の及ぼす影響は rough か smooth の2通りのみで計算されることが多く、また、軸対称条件下に拡張された解析では、中間主応力 σ_2 (周応力 σ_θ) が最大主応力 σ_1 に等しいか、または最小主応力 σ_3 に等しいとする Haar-Von Kármán の仮定^{4),5)}を採用しているのがほとんどである。本研究ではそれらの仮定の貫入抵抗算定値に及ぼす影響が極めて大きいことを指摘するとともに適用性を再検討し、より妥当性の高いコーン貫入理論を力学的、数学的に明瞭な形で定式化した。また、数値計算上、複雑な反復法をガウス-ザイデル法(Gauss-Seidel method)に帰着させることによって、明瞭な形の漸化式化を行った。

(2) 中間主応力の大きさを考慮した基礎方程式

鉛直下向きに z 軸をもつ円柱座標系 (r, θ, z) において、 z 軸に対称な応力成分は、 $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta, \tau_{rz}$ の4つである(図-1 参照)。ただし σ_r, σ_z を (r, z) 平面における主応力とし、 σ_θ は、 z 軸に関して周方向の主応力を表す。このとき変形領域内の微小要素の応力釣合い式は次のようになる。

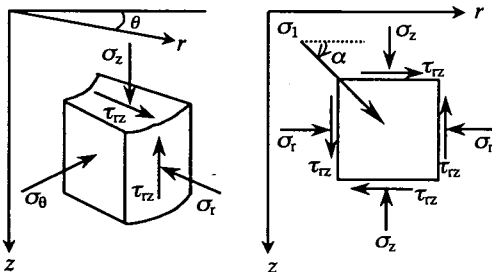


図-1 軸対称条件下での応力状態

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = \gamma$$

ここに、 γ は土の単位体積重量を表す。

金属や土の塑性変形を解析する手法の一つとして、平面ひずみ問題を対象とする特性曲線法は従来から多用されてきた。例えば、Shield⁴⁾、Cox ら⁵⁾、山口ら⁶⁾、山口⁷⁾ は3次元の主応力空間における応力状態をいくつかパターン化し、本手法の適用性を軸対称条件の下で吟味し、可容な応力場や速度場の特性を調べている。しかしながら、軸対称条件に拡張されたコーン貫入理論においては、周応力 σ_θ は最小主応力 σ_3 に等しいとする仮定を採用しているのがそのほとんどである。これは中間主応力の大きさに依存しない Mohr-Coulomb の破壊規準に対して式(1)は不静定となるため、式(1)の $\sigma_\theta (= \sigma_2)$ を σ_3 に等しいとすることで円柱座標系の問題を便宜的に解くものである。3軸圧縮試験や伸張試験のような要素試験においては $\tau_{rz} = 0$ となり、 $\sigma_2 = \sigma_3$ もしくは $\sigma_2 = \sigma_1$ が保証されるが、 $\tau_{rz} \neq 0$ ではその必然性はなく、本仮定はコーンの貫入問題にとって便宜的であること以外の積極的な意味を有しないものと考えられる。そこで本論文では、応力係数と呼ぶパラメータ μ を導入し、 μ の値を変化させることによって、周方向応力(中間主応力)の大きさを任意に変化させることのできる関係式を次のように得た(図-2 参照)。

$$\sigma_2 = \sigma_m + \mu(\sigma_m \sin \phi + c \cos \phi) \quad (2)$$

ここに、 $\mu = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$ ($-1 \leq \mu \leq 1$) である。

Haar-Von Kármán の仮定において、 $\sigma_2 = \sigma_1$ を仮定した場合 $\mu = 1$ となり、 $\sigma_2 = \sigma_3$ を仮定した場合 $\mu = -1$ となることを意味する。式(2)を用いると、Mohr-Coulomb の破壊規準に従う各応力成分は次のようになる。

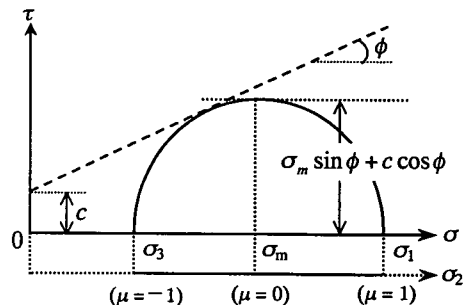


図-2 Mohr 円と中間主応力の関係

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \sigma_m(1 + \sin\phi \cos 2\alpha) + c \cos\phi \cos 2\alpha \\ \sigma_z &= \sigma_m(1 - \sin\phi \cos 2\alpha) - c \cos\phi \cos 2\alpha \\ \tau_{rz} &= (\sigma_m \sin\phi + c \cos\phi) \sin 2\alpha \\ \sigma_\theta &= \sigma_m + \mu(\sigma_m \sin\phi + c \cos\phi)\end{aligned}\quad (3)$$

ここに、 σ_m : 平均主応力 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$, ϕ : 土のせん断抵抗角, c : 土の粘着力, α : 最大主応力方向と r 軸のなす角(ただし, 時計回りを正とする), μ : 中間主応力を決定するための応力係数とする

破壊条件を満たす式(3)を応力の釣合式(2)に代入すると次に示す連立一階偏微分方程式を得る。

$$\begin{aligned}(1 + \sin\phi \cos 2\alpha) \frac{\partial \sigma_m}{\partial r} + \sin\phi \sin 2\alpha \frac{\partial \sigma_m}{\partial z} \\ - 2\sin 2\alpha (\sigma_m \sin\phi + c \cos\phi) \frac{\partial \alpha}{\partial r} + 2\cos 2\alpha (\sigma_m \sin\phi + c \cos\phi) \frac{\partial \alpha}{\partial z} \\ = -\frac{1}{r} (\sigma_m \sin\phi + c \cos\phi) (\mu - \cos 2\alpha) \\ \sin\phi \sin 2\alpha \frac{\partial \sigma_m}{\partial r} + (1 - \sin\phi \cos 2\alpha) \frac{\partial \sigma_m}{\partial z} \\ + 2\cos 2\alpha (\sigma_m \sin\phi + c \cos\phi) \frac{\partial \alpha}{\partial r} + 2\sin 2\alpha (\sigma_m \sin\phi + c \cos\phi) \frac{\partial \alpha}{\partial z} \\ = \gamma - \frac{1}{r} \sin 2\alpha (\sigma_m \sin\phi + c \cos\phi)\end{aligned}\quad (4)$$

式(4)に示した連立一階偏微分方程式系は, 特性曲線論によって常微分方程式系に帰着することができる。式(4)および σ_m と α の微分関係から, 次のような特性曲線とその曲線に沿う微分関係式を得た。以降, 得られた微分関係式を基礎方程式と呼ぶことにする。(特性曲線)

$$\frac{dz}{dr} = \tan(\alpha \pm \eta) \quad (5)$$

ただし, η : $\pi/4 - \phi/2$ である。

(基礎方程式)

$$\begin{aligned}\pm \cos(\alpha \pm \eta) \frac{d\sigma_m}{dr} + 2(\sigma_m \tan\phi + c) \cos(\alpha \pm \eta) \frac{d\alpha}{dr} \\ = \frac{\cos(\alpha \mp \eta)}{\cos\phi} \cdot \gamma - \frac{1}{r} (\sigma_m \tan\phi + c) \{ \sin(\alpha \pm \eta) + \mu \cdot \sin(\alpha \mp \eta) \}\end{aligned}\quad (6)$$

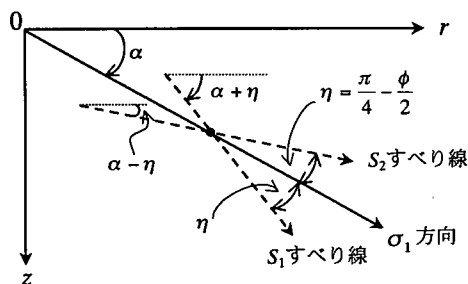


図-3 応力の特性方向

特性曲線(5)は, 式(6)で示される曲線を横切る方向において, 応力値あるいは応力の作用方向が不連続となることが数学的に許される。すなわち特性曲線に沿ってのみそれを横切る応力の不連続性が維持されることから, 特性曲線をすべり線に対応させることができる。著者らの導いた基礎方程式(6)は, $\mu = 0$ と置いた場合, 山口の導いた軸対称問題に拡張した Kötter 式⁷⁾に帰着する。また, $\mu \neq 0$ においても特性曲線を有し, 解析可能であることが示された。ただし, ここで導入した応力係数 μ の値は場所的に変化がなく, 変形領域における平均的な値として計算に用いることにする。

式(6)を力の境界条件のもとで数値計算することによって, 変形領域内の応力分布を求めることができる。図-3に示すように, r 軸に対して時計回りに $\alpha + \eta$ の角度で入るすべり線を s_1 すべり線, $\alpha - \eta$ の角度で入るすべり線を s_2 すべり線と呼ぶことにする。

(3) 境界条件と数値解法

a) 変形領域と計算の手順

本論文で扱う支持力理論は Prandtl 系の剛塑性理論⁸⁾と呼ばれるもので, 図-4に示されるような塑性変形領域を想定することによって解くものである。一方, 現在では土の圧縮性を考慮するために空洞押し広げ理論^{9), 10)}や有限要素法を用いて材料の弾塑性挙動を説明しようとする支持力理論が主流となりつつあり, とくに根入れ(貫入)が深い場合, 前者で想定する図-4のような破壊パターンは実際には観察されにくいということが定説化されている。後者の弾塑性解析では想定する破壊モードに対する妥当性は高くなる反面, 地盤の強度定数以外にも弾性定数などインプットを必要とするパラメータが増えるため, 実用性の点で問題が残るのが現状である¹¹⁾。本論文ではコーン支持力を土の c と ϕ で記述できる

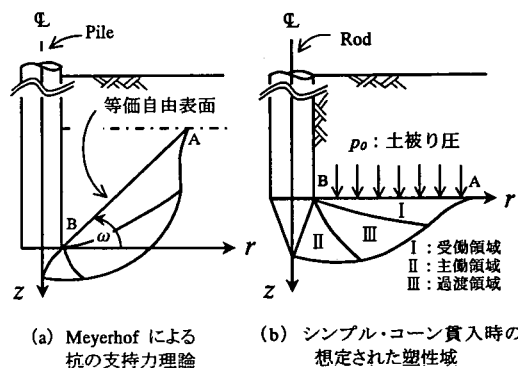


図-4 変形領域の想定図

ことから強度定数の推定に多く用いられてきた Prandtl 系の支持力理論に注目し、コーン表面粗度と中間主応力の及ぼす影響について既往の研究との比較検討することを目的として次に述べるような変形領域を想定した。

従来、コーン貫入によるすべり線場は、図-4(a)に示した杭の支持力理論に関する Meyerhof の等価自由表面 AB の概念¹²⁾を導入して求めることが多い。r 軸と等価自由表面のなす角を ω とすると甲本は砂質地盤に対して $\omega = 0^\circ$ 、粘性土地盤に対して $\omega = 90^\circ$ として計算を行っている^{13), 14)}。また Simone と Golia は、砂質地盤の実験結果から、 $-15^\circ \leq \omega \leq 0^\circ$ の範囲をとることを指摘している³⁾。本論文ではこれらの研究を受けて図-4(b)に示すように $\omega = 0^\circ$ とし、コーンの底面が位置している水平面より上方にある土のせん断破壊を省略し、土被り圧に等しい载荷重 $p_0 (= \gamma \cdot D_p)$ が水平面 AB (等価自由表面) に作用するものとして計算を行った。ただし、 D_p は地表面からコーン底面までの貫入深さである。

コーンの貫入によって地盤内に、I) 等価自由表面 AB と接する変形領域を受働領域、II) コーン表面と接する変形領域を主働領域、III) 領域 I と II をつなぐ変形領域を過渡領域として3つの部分からなる領域を想定した。ただし、コーン先端支持力のみ注目し、ロッド部の周面摩擦は考慮していない。

計算の手順は、まず適当な長さで与えられた等価自由表面 AB を任意に分割し、後述する Cauchy 問

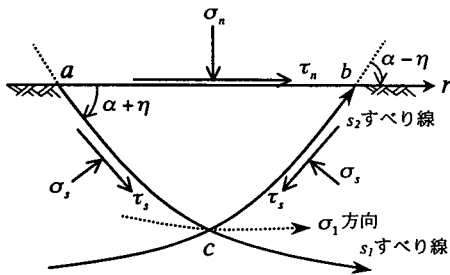


図-5 等価自由表面上の計算

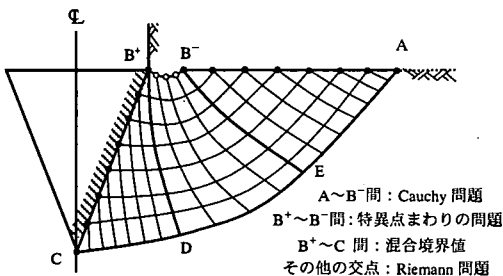


図-6 特異点まわりの計算

題によってその節点上の応力値を計算する。つぎに I, II, III の領域が集まる特異点まわりの計算を行い、Riemann 問題を解きながら、 s_2 すべり線をコーン表面に向かって組んでいく。また s_2 すべり線は特異点から外側に向かって順次生まれ、A 点につづく最も外側の s_2 すべり線がコーン先端と所定の精度で一致するまで線分 AB の長さを変更しながら計算を繰り返した。以下に数値解法 of 具体的な方法を記述する。

b) 等価自由表面上の計算 (Cauchy 問題)

すべり線でない等価自由表面上の位置と応力値が既知であるとき、これを基線としてすべり線を組み立てていく問題である。数学的には特性曲線の初期曲線を得るための Cauchy 問題である。

図-5 は等価自由表面近傍における塑性応力の3角形微小要素 Δabc から点 c の応力値を求めるための説明図である。自由表面上の応力は、 $\sigma_n = p_0$ 、 $\tau_n = 0$ となり、微小要素の釣合いとすべり線上の破壊条件より、正弦定理を用いて整理すると等価自由表面近傍の応力値は次のようになる。

$$\sigma_m = \frac{\gamma \cdot z + c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (7)$$

これに続くすべり線は、後述する Riemann 問題を適用すればよい。

c) 特異点まわりの計算

等価自由表面とコーン表面との交点には主応力方向の不連続が生じ特異点が発生する。図-6 に示すように既にすべり線を組んだ側に属する特異点を B^- 、これから組む領域の特異点を B^+ とし、 s_2 すべり線の基礎方程式(6)に関して B^- , B^+ 間を n 等分すると B_j 点 (点 B^- から数えて j 番目) での応力値は次のようになる。

$$\sigma_m(B_j) = \left\{ \sigma_m(B^-) + c \cot \phi \right\} \exp \left[2j \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{n} \tan \phi \right] - c \cot \phi \quad (8)$$

ただし、 α_1 , α_2 は点 B^- , 点 B^+ での最大主応力方向と r 軸との角度である。これに続くすべり線についても後述する Riemann 問題を適用すればよい。

d) 変形領域内部の計算 (Riemann 問題)

図-7 は (r, z) 平面におけるすべり線網の一部であり、点 b および点 d から点 c の値を求めるための説明図である。図のように α , σ_m , r , z に対してそれぞれ各点 a, b, c, d の下付き文字をつけて考えると、辺 bc 間および辺 cd 間のすべり線に関して近似的に次のような幾何学的関係式を得ることができる。

$$\begin{aligned} (z_c - z_b) &= (r_c - r_b) \tan(\bar{\alpha}_{bc} + \eta) \\ (z_c - z_d) &= (r_c - r_d) \tan(\bar{\alpha}_{cd} - \eta) \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、精度を向上させるため各点の平均値を用い、

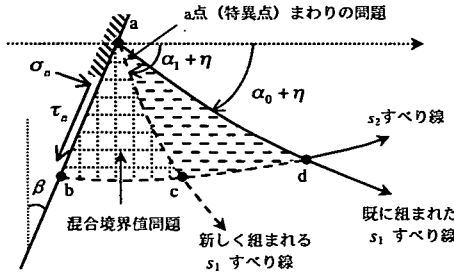


図-8 混合境界値問題の計算

ついで特異点まわりの問題と Riemann 問題を適用して新しい s_1 すべり線 ac を組むことができる。続いて、点 b における最大主応力方向も α_1 であることに注目すると、今求めようとしている点 b は、 s_2 すべり線に関する基礎方程式とコーン表面の幾何学的関係の連立より次式で算出することができる。

$$r_b = \frac{z_a - z_c + r_c \tan(\bar{\alpha}_{bc} - \eta) + r_a \cot \beta}{\tan(\bar{\alpha}_{bc} - \eta) + \cot \beta} \quad (16)$$

$$\sigma_{mb} = \frac{g_1 \left[\frac{\cos(\bar{\alpha}_{bc} + \eta)}{\cos \phi} \cdot \gamma - g_2 \cdot (\sigma_{mc} \tan \phi + c) \right] - g_3 + \sigma_{mc}}{1 + (\alpha_c - \alpha_b) \tan \phi + g_1 \cdot g_2 \tan \phi} \quad (17)$$

ここに、

$$g_1 = \frac{r_c - r_b}{(r_c + r_b) \cos(\bar{\alpha}_{bc} - \eta)}$$

$$g_2 = \sin(\bar{\alpha}_{bc} - \eta) + \mu \sin(\bar{\alpha}_{bc} + \eta)$$

$$g_3 = (\alpha_c - \alpha_b) (\sigma_{mc} \tan \phi + 2c)$$

である。

(4) コーン支持力の算出

コーン表面の傾斜 (2β) と式 (17) によって計算された応力値 σ_{mb} から、図-9(a) に示した用極法を用いてコーン表面に作用する鉛直応力 (接地圧) σ_s とせん断応力 τ_s は次のように表すことができる。

$$\sigma_s = \sigma_{mb} + (\sigma_{mb} \sin \phi + c \cos \phi) \cos 2(\alpha_1 - \beta) \quad (18)$$

$$\tau_s = (\sigma_{mb} \sin \phi + c \cos \phi) \sin 2(\alpha_1 - \beta)$$

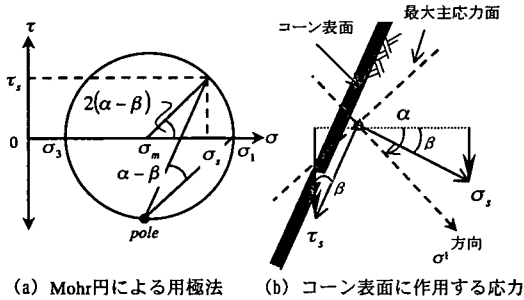


図-9 コーン支持力の算出

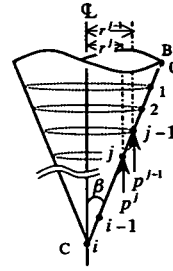


図-10 コーン表面に作用する抵抗力

また、コーン表面の任意の点に作用する応力の鉛直成分 p_v は、図-9(b) の幾何学的関係から次のように表すことができる。

$$p_v = \sigma_s \sin \beta + \tau_s \cos \beta \quad (19)$$

図-10 に示すように自由表面の分割数を i とするとコーン表面の節点は点 B を 0 番目として、コーン先端に向かって i 番目まで存在することになる。 j としたとき、 $j-1$ 番目と j 番目の点に作用する p_v の平均値をコーン表面まわり全域について積分することで求めた。このとき、 Q_c および支持力 q_c は次のように表せる。

$$Q_c = \sum_{j=1}^i \frac{p_v^j + p_v^{j-1}}{2 \sin \beta} \pi \left\{ (r^{j-1})^2 - (r^j)^2 \right\} \quad (20)$$

$$q_c = \frac{Q_c}{\pi (r^0)^2} \quad (21)$$

ここに、 $j = 1, 2, 3, \dots, i$ とする。

(5) 計算結果と考察

a) すべり線網の形状および支持力

図-11 はコーン表面と土との境界面での摩擦角 δ

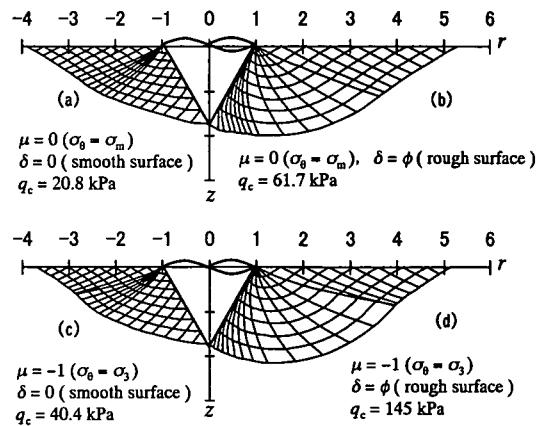


図-11 すべり線網の一例
($\beta = 30^\circ$, $\phi = 30^\circ$, $c = \gamma = 1$, $p_0/c = 1$)

表-1 コーン支持力 N_c の計算結果

δ/ϕ ϕ (deg) μ	0 (smooth surface)					0.55					1 (rough surface)				
	-1	-0.5	0	0.5	1	-1	-0.5	0	0.5	1	-1	-0.5	0	0.5	1
0	4.50	4.06	3.60	3.12	2.61	5.91	5.43	4.92	4.39	3.78	6.84	6.32	5.79	5.22	4.61
10	6.74	5.74	4.83	3.99	3.19	10.1	8.67	7.41	6.24	5.05	12.3	10.6	9.10	7.69	6.38
20	11.0	8.64	6.76	5.24	3.99	19.8	15.4	12.0	9.34	7.01	26.1	20.1	15.6	12.0	9.16
30	19.7	13.8	9.86	7.09	5.07	45.9	30.5	20.9	14.7	9.99	67.7	43.4	28.9	19.7	**
40	40.6	24.1	15.2	9.97	6.63	139	70.8	40.5	24.6	14.8	237	112	59.3	34.7	**
50	105	48.4	25.9	15.0	9.077	639	210	91.2	45.7	23.2	1140	379	147	**	**

* Potyondy¹⁶⁾ による $\delta \sim \phi$ 関係 ($\delta = 0.55 \phi$) に基づく計算. ** 計算不能

表-2 コーン支持力 N_q の計算結果

δ/ϕ ϕ (deg) μ	0 (smooth surface)					0.55					1 (rough surface)				
	-1	-0.5	0	0.5	1	-1	-0.5	0	0.5	1	-1	-0.5	0	0.5	1
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	2.18	2.00	1.84	1.69	1.55	2.77	2.52	2.30	2.09	1.89	3.16	2.87	2.60	2.35	2.12
20	5.00	4.14	3.45	2.89	2.43	8.19	6.59	5.36	4.38	3.59	10.5	8.34	6.67	5.37	4.33
30	12.4	8.97	6.68	5.07	3.90	27.5	18.6	13.1	9.44	6.92	40.1	26.1	17.8	12.4	8.82
40	35.1	21.2	13.8	9.34	6.52	117	60.4	34.9	21.6	13.9	201	95.3	51.6	30.2	**
50	126	58.7	31.8	18.8	11.8	762	251	110	55.3	30.4	1700	455	176	**	**

* Potyondy¹⁶⁾ による $\delta \sim \phi$ 関係 ($\delta = 0.55 \phi$) に基づく計算. ** 計算不能

について $\delta = 0$ (smooth), ϕ (rough) の 2 者と中間主応力を決定するための応力係数 μ について $\mu = -1$ ($\sigma_\theta = \sigma_3$), 0 ($\sigma_\theta = \sigma_m$) の 2 者の計 4 者について描かれたすべり線網図である. 計算は, 次式の文字を用いて無次元化を行った.

$$r' = \frac{\gamma \cdot r}{c}, \quad z' = \frac{\gamma \cdot z}{c}, \quad \sigma' = \frac{\sigma}{c}, \quad p_0' = \frac{p_0}{c}$$

これによって, ある決まった ϕ の値に対して得られた解を, 異なる値の γ, c に利用することができる. 本例では 60° コーンの貫入に関して, $p_0 = c$ ($p_0' = 1$), $\phi = 30^\circ$ としたときの計算を行った. ただし, 慣行に従って無次元であることを表すダッシュは省略する.

図-11 の (a), (b) は周応力を $\sigma_\theta = \sigma_m$ としたときの計算結果である. 一方, (c); (d) は従来の研究で多用される $\sigma_2 = \sigma_3$ とした場合の Haar-Von Kármán の仮定のもとで計算されたすべり線網とコーン支持力である. これらの計算結果を比較すると, 中間主応力の大きさは, すべり線網の形状には影響しにくい, コーン支持力には極めて大きな影響を及ぼすことが分かる. また, コーン表面粗度は, すべり線網の形状, 支持力ともに極めて大きな影響を及ぼすことを示唆する結果である. δ と μ の影響をより詳しく調べるために, 以下にコーン支持力係数 (cone factor) の考え方をういた考察を行なうことにする.

b) コーン支持力係数

コーンの貫入問題は, Terzaghi¹⁵⁾ や Meyerhof⁸⁾ の支持力理論と同様に, 重ね合わせが近似的に成立

するものと仮定すると, コーン支持力 q_c は次式のよう

$$q_c = \xi_c \cdot c \cdot N_c + \xi_\gamma \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma + p_0 \cdot N_q \quad (22)$$

ここに, q_c : コーン支持力, ξ_c, ξ_γ : コーン先端の形状係数, N_c, N_γ, N_q : コーン支持力係数, p_0 : 土被り圧 ($= \gamma \cdot D_p$), B : コーン底面直径とする.

式(22)において, ϕ の値を固定し, $\gamma = 0, p_0 = 0$ として計算される q_c 値から粘着力による支持力係数 N_c を求めることができる. また, $c = 0, \gamma = 0$ として計算される q_c 値から土被り圧による支持力係数 N_q を求めることができる. δ と μ を変化させた場合に得られた支持力係数 N_c, N_q を表-1, 2 に示した.

c) δ の影響

δ に関してコーン表面がなめらかな場合 ($\delta = 0$) と粗い場合 ($\delta = \phi$) の 2 者に加え, $\delta/\phi = 0.55$ という場合についても一連の計算を行った. この関係は Potyondy¹⁶⁾ が様々な土質と他材料間のせん断試験を実施し, 表面のなめらかなスチールと粘土および密な乾燥砂の間で得た値である. 表-1, 2 の結果によると, ϕ の値を固定した場合, コーンの表面が粗くなるにつれて, また応力係数が小さくなるにつれて N_c, N_q はともに大きくなる傾向があることがわかる. また, N_c, N_q の値は, ϕ の増加に伴って飛躍的に大きくなる傾向がある. 図-12 は, N_c, N_q の両者について, コーン表面のなめらかな場合に対する粗い場合の比率を表している. また, 参考のため, 勝見¹⁷⁾ によって計算された円形直接基礎に対する

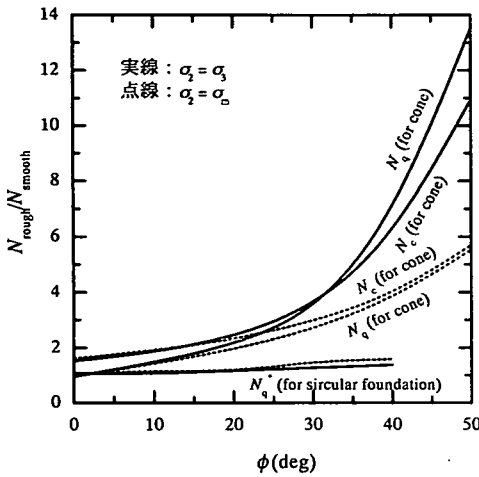


図-12 コーン表面が N_c , N_q に及ぼす影響

支持力係数の比率(図上では区別するため N_c^* と示した)を同図上にプロットした. 円形基礎の場合, $0^\circ \leq \phi \leq 40^\circ$ の範囲においてその比率は 1.1 ~ 1.6 程度であるのに対して, コーンの場合は最大のもので 7 程度と極めて大きい結果を得た. また, ϕ の増加に伴って, 表面粗度の影響は N_c , N_q の両者ともに顕在化するようである. さらに, $\phi = 30^\circ$ 程度以上になると, 中間主応力の大きさの及ぼす影響も円形基礎の場合に比べてより顕著となるようである. このことから表面粗度の及ぼす影響は極めて大きく, 特に摩擦性の地盤に対して精度の良い支持力を求めるためには, 表面粗度を適切に評価する必要があると考えられる. これ以降の解析では, 特に言及しない限り, Potyondy の実験結果 $\delta = 0.55\phi$ を採用することにした.

d) μ の影響

図-13, 14 のそれぞれに N_c および N_q の計算結果と ϕ の関係を示した. 図中の N_c , N_q 値はともに, 応力係数 μ を $-1.0, -0.5, 0, 0.5, 1.0$ の 5 通りに変化させた計算値を示した.

図-13 には, Durgunoglu と Mitchell による極限平衡法を用いた解析結果¹⁸⁾を併せてプロットした. 彼らは, 限界相対深さ (critical relative depth: $(D_p/B)_{cr}$) という概念を用い, 貫入深さが $(D_p/B)_{cr}$ より大きくなると, 貫入抵抗力の増加率は小さくなるか, もしくは一定になることを指摘している. 図中に示した Durgunoglu らによるデータは, (D_p/B) を 0 ~ 20 まで変化させ, $\delta/\phi (= 0.5)$ を一定とした場合の解析結果である.

図-14 には, 著者らの計算結果に併せて, Robertson

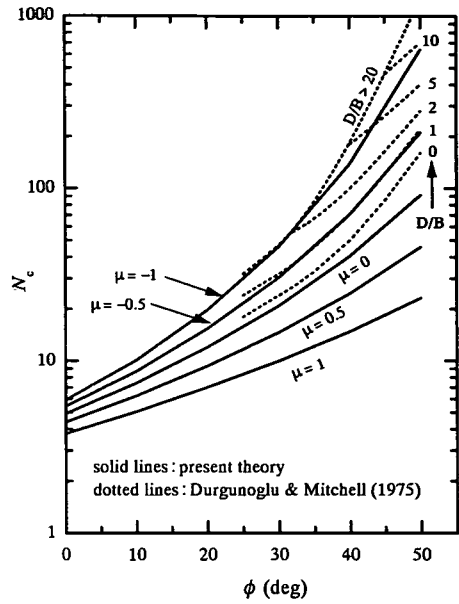


図-13 N_c と ϕ の関係

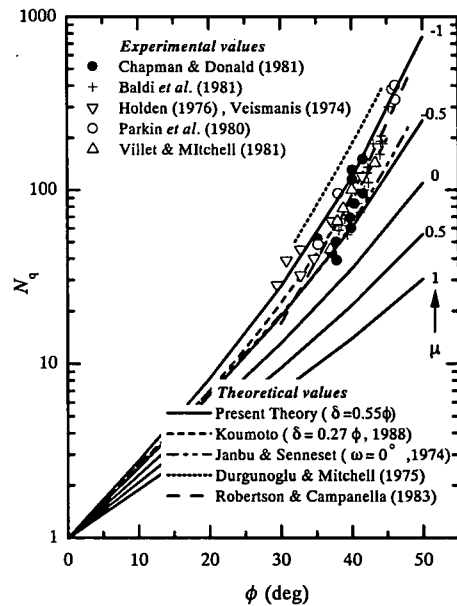


図-14 N_q と ϕ の関係

と Campanella がまとめた複数の研究者による ϕ と N_q の関係¹⁹⁾をプロットした. ただし, 実験値の N_q はピーク強度状態のせん断抵抗角 ϕ に対応している. Robertson らは実験値の平均を用いて Janbu らと Durgunoglu らの与えた理論値の中間的な値を示す関係を提案している. また, Koumoto¹³⁾の提案した関係は, $\delta/\phi = 0.27$ とし, $\alpha_2 = \alpha_3$ とした場合の Haar-Von

表-3 試料の物理特性

試料	豊浦砂	珪砂5号	珪砂8号
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.61	2.62	2.64
最大間隙比 e_{max}	0.95	1.04	1.49
最小間隙比 e_{min}	0.58	0.68	0.80
60% 粒径 D_{60} (mm)	0.18	0.61	0.07
50% 粒径 D_{50} (mm)	0.15	0.59	0.07
30% 粒径 D_{30} (mm)	0.13	0.51	0.06
10% 粒径 D_{10} (mm)	0.11	0.43	0.04
均等係数 U_c	1.64	1.43	1.75
曲率係数 U_c'	0.91	0.98	1.08

表-4 作成した地盤の単位体積重量とせん断抵抗角

グループ		豊浦砂	珪砂5号	珪砂8号
dense	γ (kN/m ³)	15.5±0.16	15.6±0.12	12.1±0.02
	ϕ (deg)	37.6 ~ 38.8	43.4 ~ 45.2	34.4 ~ 35.5
medium	γ (kN/m ³)	13.8±0.07	13.8±0.26	11.3±0.12
	ϕ (deg)	32.5 ~ 33.0	35.4 ~ 35.7	33.7 ~ 34.3
loose	γ (kN/m ³)	13.3±0.05	13.2±0.09	9.97±0.14
	ϕ (deg)	31.7 ~ 31.9	34.7 ~ 34.9	30.6 ~ 31.4

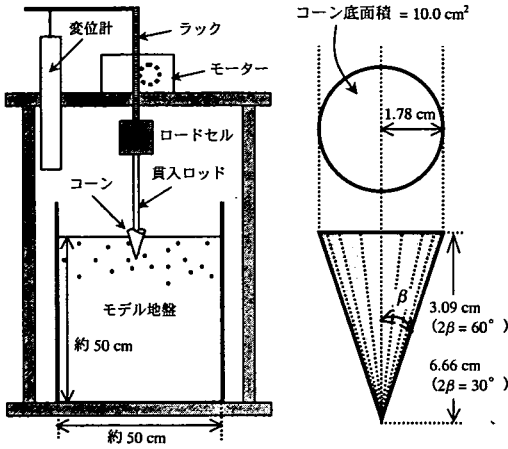


図-15 実験装置概略図とコーン形状

Kármán の仮定を採用した場合の軸対称条件下での解である。

図-13, 14 が示すように、 N_c と N_q はともに、応力係数 μ の値に極めて大きな影響を受け、また、 ϕ の値が大きくなるにつれてその影響は顕在化することがわかる。 N_c と ϕ の関係についての研究例が少ないため比較が困難であるが、 N_q について $-1 \leq \mu \leq -0.5$ 付近で良い一致を示している。これは、周応力が平均主応力よりも小さくなることを意味する。コーンの貫入によって周辺地盤が半径方向へ押し広げられ、周方向のひずみが引っ張り方向に生じると考えると妥当性を認めることのできる結果である。

図-13, 14 からわかるように、精度の良い支持力値を得るには μ の値を厳密に評価することが不可欠と考えられる。そこで著者らは μ の値を実験的に求めるために $2\beta = 30^\circ, 60^\circ$ の先端角を有する2種類のコーンを用いた簡単な貫入モデル実験を行ったのでその概要について記述する。

モデル地盤は比較検討を簡単にするために $c = 0$ とみなせる気乾燥砂を用いた。用いた砂試料は、豊浦砂、珪砂5号および珪砂8号の3種類である。各試料の物理特性を表-3 に示した。直径約 50 cm (塩化ビニル製) の円筒形土槽を用い、各試料に対して相対的に3通りの密度のグループ (密詰め、中位、緩詰め) となるように狙って地盤を作成した。表-4 に作成した地盤の単位体積重量とせん断抵抗角を示した。ここで示したせん断抵抗角は所定の密度を再現した一面せん断試験で得られたピーク強度による最大せん断抵抗角である。原則として密詰めの土槽は多重ふるいを用い、緩詰めの場合はふるい引き上げ法²⁰⁾によって地盤を作成した。また、中位の地盤

は一旦ふるい引き上げ法によって緩い状態をつくり、土槽側面から木槌によって均等に所定の打撃を与えることによってある程度締固めた。なお、いずれの場合も試料高さは約 50 cm とした。

図-15 に実験装置および使用したコーンの概略図を示した。使用したステンレス製のコーンは底面積を 10 cm^2 とし、先端角 $2\beta = 30^\circ, 60^\circ$ の2種類を用いた。リニアドモータ (SL-U タイプ, オリエンタルモータ社製) によって一定速度 (1.0 mm/s) でコーンを土槽中央に貫入し、貫入ロッドとラックの結合部分に取り付けられたロードセル (TCLZ タイプ, 東京測器研究所製) によって貫入抵抗力を測定した。また同時に変位計 (SDP-D タイプ, 東京測器研究所製) によって貫入量も計測した。なお、本論文では計算の境界条件を簡単にして理論値との比較検討を容易にするため、コーンが地表面に没した瞬間の抵抗力を底面積で除した値を支持力値 q_c として以下の考察を行った。

図-16 は実験および理論で得られた支持力 q_c とせん断抵抗角 ϕ の関係である。計算値は、重ね合わせの仮定を用いず、 $c = 0 \text{ kPa}, p_0 = 0 \text{ kPa}, \gamma = 16 \text{ kN/m}^3$ (γ の変化の及ぼす影響は小さく、実験に使用した材料の平均値を用いた) とし式 (6) に示した Kötter 式を直接解いて得られた支持力値である。

30° コーンに関しては、各種の砂において相対密度が比較的小さい場合、 $\mu = -0.5$ 付近を中心として

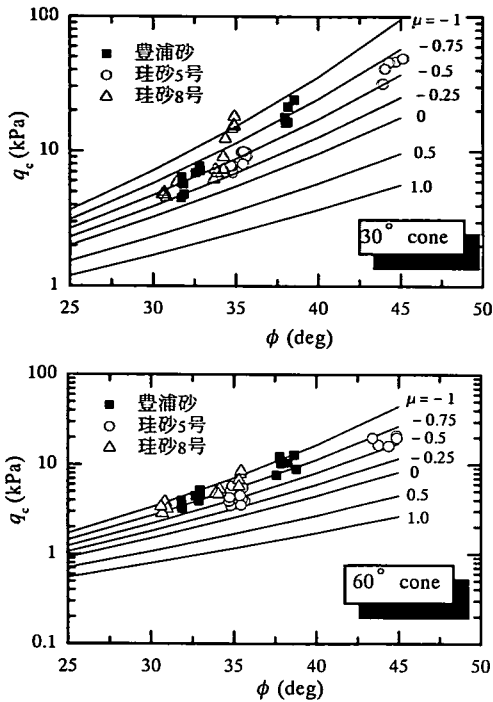


図-16 実験値と理論値の比較

$-0.75 \leq \mu \leq -0.25$ の範囲で一致が見られるようである。一方、 60° コーンの場合、前述した他の研究で示される N_q と ϕ の関係とはほぼ同様に $\mu = -0.75$ 付近を中心として、 $-1 \leq \mu \leq -0.5$ の範囲でよい一致が見られるようである。特に 30° コーンの場合、いずれの試料においても ϕ の大きい密詰の場合には、 q_c のプロット群に対応する μ の値がそれ以外の場合より大きくなっている。これは砂が密に詰まった場合のインターロッキング効果による見かけ上の粘着力が作

用することで実測値が $c = 0$ として解いた理論値を上回ること起因している可能性がある。したがって 30° コーンにおいて、相対密度の大きい地盤に対して $\mu = -0.5$ とした場合の理論値は実験地を過小に評価することになり、また、従来多用される $\sigma_2 = \sigma_3$ とする Haar-Von Kármán の仮定を緩い地盤で適用すると支持力を過大に評価することとなる結果であり、コーン抵抗値を用いた砂質地盤の摩擦角の推定に関して、 ϕ を過小に評価することに繋がる可能性がある。

3. コーン抵抗値による強度定数の推定

(1) 従来 の推定法

地盤工学会基準に定められている電気式静的コーン貫入試験²¹⁾によると、コーン先端抵抗 q_t と粘性土の非排水せん断強さ c_u は次式によって関連づけられている。

$$q_t = N_{kt} c_u + p_v \quad (23)$$

ここに、 q_t : コーンの有効断面積で補正した先端抵抗 (kN/m^2)、 N_{kt} : コーン係数、 c_u : 非排水せん断強さ (kN/m^2)、 p_v : 土被り圧 (全応力) (kN/m^2) とする。これは式 (23) において完全非排水条件を満たす粘土のように $\phi \rightarrow 0^\circ$ となる場合、いずれの μ の値に対しても $N_q \rightarrow 1$ となること (表-2 参照) から、 $N_c \rightarrow N_{kt}$ 、 $c \rightarrow c_u$ 、 $p_0 \rightarrow p_v$ と書き換えることによって式 (22) は式 (23) に帰着する。

係数 N_{kt} は理論的あるいは実験的な方法によって様々な値が求められている。甲本がこれまでの研究をまとめており、 N_{kt} の値として、土質工学会の土質調査法は 14~17 を、田中らは 8~16 を、Lunne は

表-5 支持力理論による従来 の研究

土質	著者	解析手法・仮定	支持力係数・主要な結果
粘土	Meyerhof (1961)	極限平衡法 (平面ひずみ問題)	$N_c = 1.15 \times (6.28 + \alpha + \cot(2/\alpha))$ ***
	Durgunoglu & Mitchell (1975)	極限平衡法 (平面ひずみ問題)	$N_c = 1.2 \times (2.443 + 3.303\lambda + \sin\{(1-\lambda)\pi/2\})$ **
	Houlsby & Wroth (1982)	すべり線場法 (軸対称問題)	貫入深さとともに増加する
	Koumoto & Kaku (1982)	すべり線場法 (軸対称問題)	貫入深さがコーン直径より大きくなると一定となる
砂	Janbu & Senneiset (1974)	極限平衡法 (平面ひずみ問題)	$N_q = (1 + \sin \phi') / (1 - \sin \phi' \exp\{(\pi - 2\beta) \tan \phi'\})$
	Durgunoglu & Mitchell (1975)	極限平衡法 (平面ひずみ問題)	$N_q = 0.194 \exp(7.629 \tan \phi')$
	Sokolovskii (1965)	すべり線場法 (平面ひずみ)	$N_q = K \frac{\cos \delta_1 \cos(\omega_2 + \delta_2)(1 + \sin \phi \cos(\Delta_2 + \delta_2))}{\cos \delta_2 \cos \omega_2 (1 - \sin \phi \cos(\Delta_1 - \delta_1))}$ ***
	De Simone & Golia (1988)	すべり線場法 (平面ひずみ)	軸対象解は平面ひずみ解より大きな N_q を与える
	Koumoto & Kaku (1982)	すべり線場法 (軸対称問題)	コーン表面粗度の影響が大きい

* α : コーン先端角, ** λ : コーンの粗度に関するインジケータ ($\lambda = 1$: rough, 2 : smooth), *** $K, \delta_1, \delta_2, \omega_1, \omega_2, \Delta_1, \Delta_2$: すべり線場法で Sokolovskii(1965)が与えた変数と角度。ここに、 $K = \exp\{\pi - 2\omega_2 - (\Delta_2 + \delta_2) - 2\alpha_1 - (\Delta_2 - \delta_1)\} \tan \phi$, $\sin \Delta_i = \sin \delta_i / \sin \phi$ $i = 1, 2$

15~19を、La Rochelleらは12~18をそれぞれ実測値の範囲として得ているとした²²⁾。

一方、砂質土の場合では粘着力 c が比較的小さくなることから式(22)の第1項を近似的に省略し、 N_q のみについて検討されることが多い。

砂質地盤に対しては排水条件を満たし、有効応力表示によるせん断抵抗角 ϕ' と q_t を関連付けるために室内キャリブレーション・チャンパー試験や理論的研究が数多く行われ、 ϕ' と q_t / σ_{v0}' (σ_{v0}' : 有効拘束圧)の関係が求められている。 q_t / σ_{v0}' は土被り圧によるコーン支持力係数 N_q に相当し、この値はせん断抵抗角 ϕ' に依存している点で粘性土のコーン係数 N_{kt} と性質を異にしている。

RobertsonとCampanellaは、コーン貫入試験を砂と粘土に分けて別々に解釈している^{19), 23)}。また、YuとMitchell²⁴⁾および甲本²²⁾は、コーン貫入メカニズムに関するこれまでの研究を取りまとめている(表-5参照)が、ここでも土質を粘土と砂に大別して検討することが多いようである。このように従来の方
法で実質的に推定し得る強度定数は、粘性土地盤における非排水せん断強度 c_u と砂質地盤における排水条件下のせん断抵抗角 ϕ' (あるいは ϕ_d)である。このように対象地盤が特定される場合、従来の推定法は有用と考えられるが、 c - ϕ 材に対する適用性は低く、単独のコーン貫入試験から c と ϕ の両者を同時に推定することは不可能である。

(2) 地盤表層部の c 、 ϕ 推定法の提案

本論文では、 c と ϕ の両者を有する地盤を想定し、特性曲線法を用いて強度定数とコーン支持力との関係を明らかにした。コーン支持力は μ に極めて大きな影響を受けることが判明したが、同時に ω の決定と等価自由表面に作用する応力値にも大きく依存することが予想される。本論文では既往の研究を受け、 $\omega = 0$ とする水平方向と平行な等価自由表面を仮定して土被り圧を作用させることによって計算を行った。したがって貫入が深くなるにしたがって支持力が増加することとなり、貫入深さに対するコーン抵抗値の増加傾向に頭打ちがみられる²⁵⁾という実際の現象とは異なる結果となることが懸念される。現時点では深い貫入時の境界条件として等価自由表面と作用する応力値の決定に関して明確な結論を得ていないのが現状である。また、前に述べたように特性曲線法によるすべり破壊と実際の破壊モードの相違に関する問題があるが、根入れの浅い基礎の支持力問題には本手法が多く用いられているように、浅い貫入問題への適用は境界条件の設定が簡単になるとともに破壊パターンも妥当性を有することが予想

され、有用性を十分に期待することができるだろう。そこで本論文ではコーン貫入試験による地盤の強度定数推定に関する基礎的研究として、実測したコーン抵抗値から路床や路盤などの土構造物表層部の強度定数を簡単に推定する方法を提案する。例えば締固めた土のコーン指数試験方法(案 JIS A 1228 : 2000)²⁶⁾の手順と同様に、モールドに再現した試験サンプルへの貫入で安定処理土などの力学特性の評価に役立つなど、新しいコーン指数試験の一つとして将来的な有用性を見出すことができると考えている。ただし、本論文では地盤は排水条件が満たされるものとした。

コーンの先端角 2β 、地盤の強度定数(c 、 ϕ)および貫入深さに対応する土被り圧 p_0 を計算に代入するとコーン支持力 q_c を得ることができる。ただし、計算は、本研究で妥当性の認められた諸パラメータ($\delta = 0.55\phi$ 、 $\mu = -0.5$ (30° コーン)、 $\mu = -0.75$ (60° コーン))を用いて算出した。地中の土の自重 γ が一定であるとする、 $p_0 = \gamma \cdot D_p$ の関係から、コーンの貫入深さ D_p ごとに、(c 、 ϕ)のある一つの組み合わせに対して一義的に q_c を求めることができる。このとき、(c 、 ϕ)を独立変数とし、 q_c を従属変数とする2変数の関数系(写像)として捉え、 c と ϕ をそれぞれ軸とする平面に対して q_c は3次元空間に曲面を与えることになる。ただし、ここで定義される平面は貫入深さごとにその都度更新され、 q_c 値も変化することに注意が必要である。図-17は 60° コーンに対して $0 \leq c$ (kPa) ≤ 30 、 $0 \leq \phi$ (deg) ≤ 50 の範囲で計算される q_c の曲面を3次元的に表した計算結果例である。ただし、 q_c 値は土被り圧が発生しない貫入深さ、すなわちコーンが地盤に没した瞬間を想定した計算値

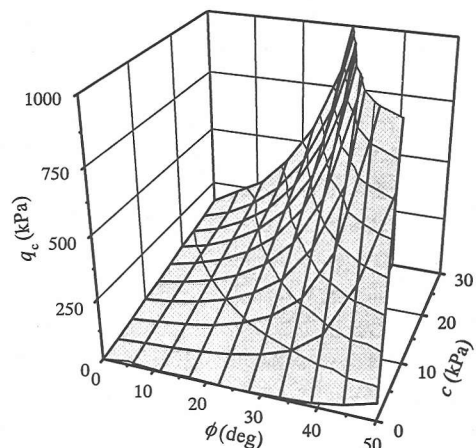


図-17 q_c の描く曲面(60° コーンの場合)

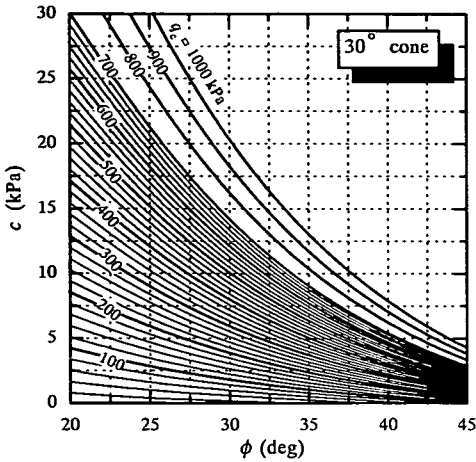


図-18 q_c のコンター図(30° コーンの場合)

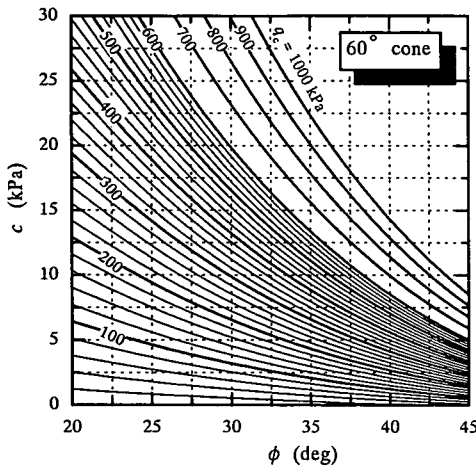


図-19 q_c のコンター図(60° コーンの場合)

である。

また、図-17 を俯瞰することによって、 c 、 ϕ を軸とする平面上に q_c のコンター図を描くことができる。図-18、19 は 30° コーンと 60° コーンのそれぞれの場合について得られたコンター図である。この図をあらかじめ準備しておくことで、地表層部への貫入実測値と何らかの方法で c が求められたとき直ちに ϕ を、または実測値と何らかの方法で ϕ が求められたとき直ちに c を推定できる可能性がある。例えば $c = 0$ と予想される材料では、実測された q_c に対応する 1 本のコンターと ϕ 軸の切片の値を ϕ の推定値とすることができる。これは従来の砂地盤に対する ϕ の推定法に帰着するものである。

続いて、コーンの先端角によって発揮される抵抗力の異なることが予想されることから、先端角の異

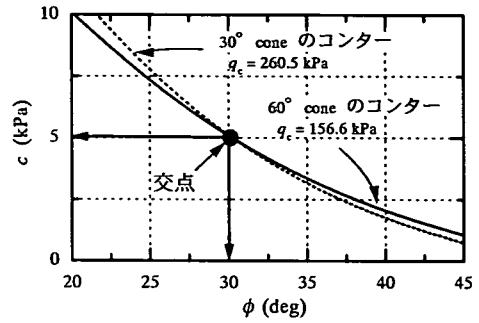


図-20 2本のコンターの交点

なるコーン（例えば 30° コーンと 60° コーン）による貫入試験を併せて実施することで c 、 ϕ を同時に推定できる可能性のあることを述べる。

実測された支持力に対応する 1 本のコンター（即ち支持力が一定となるような曲線）上には c 、 ϕ を 1 組とする組み合わせが無数に存在することになる。しかし 1 本のコンターからの情報だけでは一義的にその組み合わせを決定することはできない。そこで先端角別の実測値に対応するコンター図の軸を重ね合わせることによって 2 本のコンターはある一点で交わることとなり、その交点をもって対象地盤の c と ϕ の推定値とすることができると考えた。例えば、 $c = 5.0$ kPa、 $\phi = 30^\circ$ 、 $p_0 = 0$ kPa、 $\gamma = 16$ kN/m³ なる地盤条件での支持力の理論値は 30° および 60° コーンでそれぞれ $q_{c(60^\circ)} = 156.6$ kPa、 $q_{c(30^\circ)} = 260.5$ kPa が与えられ、それぞれのコンターを重ね合わせると図-20 のようになる。このとき、理論的には 2 本のコンターの交点 $(c, \phi) = (5, 30)$ は、それぞれのコーン支持力に一致する唯一の組み合わせであることを意味する。このように、2 本のコンターが交点を有するとき、その q_c 値の組み合わせと (c, ϕ) の組み合わせは 1 対 1 に存在することから、あらゆる組み合わせによる計算結果をもとに図-21、22 を示すことができる。これらの図は 30° コーンと 60° コーンの q_c 値の組み合わせと c および ϕ の関係を表したものである。ポータブル・コーンのように人力による地表面への貫入を想定し、その貫入能力を考慮して支持力の上限値を 500 kPa (30° コーン)、400 kPa (60° コーン) とした。これらの図を用いることによって、先端角の異なるコーン貫入試験の実測値より、地盤表層部の c 、 ϕ を直ちに推定できる可能性がある。また、貫入深さを計算に代入することによって、任意の深さに対応するコンター図を描くことができるので、提案する推定法のアイデアは、地盤表層部に限らず地中深くへの貫入にも理論的に適用可能である。

4. 結論

本論文では、 c と ϕ の両者を有する地盤を想定し、特性曲線法を軸対称条件下でコーン貫入問題に適用した。中間主応力ならびにコーン表面の粗度の影響に着目した解析を行ない、従来の研究例および著者らが行った簡単なモデル実験との比較検討を試みた。また、理論解析の結果からコーン貫入抵抗の実測値と地盤の強度定数の関係を明らかにし、路床などの土構造物表層における c と ϕ を同時に推定するためのアイデアを提案した。これらの成果を要約すると次のようになる。

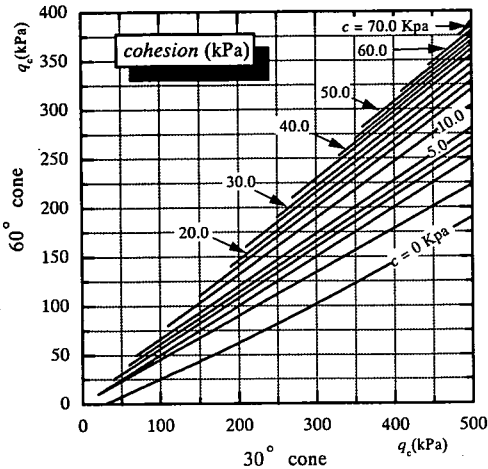
(1) 応力係数 μ を定義することによって、中間主応力を $\sigma_2 = \sigma_m + \mu(\sigma_m \sin \phi + c \cos \phi)$ のように表すことができる。中間主応力の大きさは、コーン支持力の解析解に極めて大きな影響を及ぼすことが判明した。複数の研究者ならびに著者らが行った実験値との比較検討により $\mu = -0.75$ 付近を中心として、 $-1 \leq \mu \leq -0.5$ の範囲で良い一致を示すことが判明した。ただし、 $\mu = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$ ($-1 \leq \mu \leq 1$) とし、基準化されている 60° コーン²¹⁾ を対象とした場合の値である。

(2) Haar-Von Kármán の仮定において $\sigma_2 = \sigma_3$ とした場合の数値解は、緩詰め地盤において、支持力を過大に評価する可能性がある。この場合、コーン抵抗値から推定される砂質地盤の摩擦角 ϕ は過小評価される可能性がある。

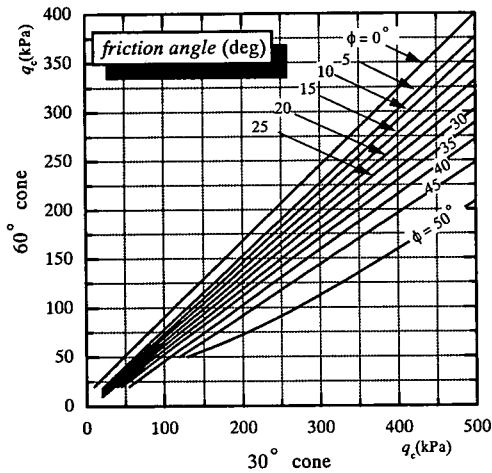
(3) コーン支持力係数 N_c 、 N_q の両者について、コーン表面のなめらかな場合に対する粗い場合の比率は $1.0 \sim 7.0$ 程度となり、コーン表面粗度の及ぼす影響は極めて大きいことが判明した。特に摩擦性の地盤において、精度の良い支持力を求めるためには、表面粗度を適切に評価する必要がある。

(4) コーンの先端角と貫入深さを指定したとき、発揮される先端支持力 q_c と強度定数 (c 、 ϕ) の関係を q_c 値のコンター図として示すことができた。本論文では、地表面へのコーンの押し込み問題を想定し、 60° および 30° コーンのそれぞれについてのコンター図を示した。

(5) 異なる先端角を有するコーン(例えば 30° コーンと 60° コーン)を貫入することによって得られる2つの実測抵抗値の組み合わせから、 c と ϕ の両者を同時に推定するためのアイデアを提案し、図-21を理論的に得ることができた。



(a) q_c 値と粘着力の関係



(b) q_c 値とせん断抵抗角の関係

図-21 異なる q_c 値から推定される強度定数

ただし、図-21 から明らかなように、 c や ϕ の推定値は q_c 値の組み合わせに非常に敏感であり、実測されるコーン抵抗値が十分な精度を有しない限り、信頼性の高い推定値を期待することは困難であると考えられる。実証実験の実施を含め、提案した推定法の実用性の拡充を図るためにはいくつかの課題が残されているが、図-17~21 に示した図はいずれもコーン支持力 q_c と c 、 ϕ の両者の関係を定量的に示している点で、 c - ϕ 地盤への CPT の適用性の拡大に寄与するものと考えている。

5. あとがき

本論文では最終的に、異なる先端角を有するコーン(30°コーンと60°コーン)の実測抵抗値から直ちに c と ϕ を同時に推定できる可能性のある図-21を提案することができた。ただし、現段階ではそれらを実証する実験データが不足しているため本文中にはそれらを掲載するには至らなかった。また、提案した手法の適用性や実用性の拡充を図るため、今後必要性の高いと思われる課題項目として次の4つを挙げるここができるだろう。

①特性曲線法のコーン支持力問題への適用限界の把握。

②コーン先端抵抗の測定精度および実測データの信頼性に関する検討

③推定された強度定数の本質的な意味付けの検討

④地中への深い貫入時における推定法の確立

以上のように、CPTによる地盤の強度定数の推定は重要な課題をいくつか抱えているが、 q_c 値と c 、 ϕ の両者の関係を定量的に示している点で、本研究で得られた成果がCPTの適用性の拡張への一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 例えば Koumoto, T. : Ultimate Bearing capacity of cones in sand, *Penetration Testing 1988, ISOPT-1, Vol.2*, pp. 809-813, 1988.
- 2) 例えば Houlsby, G. T. : Theoretical analysis of the fall cone test, *Géotechnique*, Vol.32, No.2, pp.111-118, 1982.
- 3) 例えば Simone, P. De. and Golia, G. : Theoretical analysis of the cone penetration test in sands, *Penetration Testing 1988, ISOPT-1, Vol.2*, pp. 729-735, 1988.
- 4) Shield, R. T. : On the plastic flow of metals under conditions of axial symmetry, *Proc. Roy. Soc. of London*, (A) Vol.233, pp.267-287, 1955.
- 5) Cox, A. D., Eason, G. and Hopkins, H. G. : Axially symmetric plastic deformation in soils, *Phil. Trans. Roy. Soc. of London*, (A) Vol.254, pp.1-45, 1961.
- 6) 山口柏樹, 木村孟, 寺師昌明 : 円筒座標に関するKötterの方程式と支持力論への適用, 第2回土質工学研究発表講演集, I-21, pp.117-122, 1967.
- 7) 山口柏樹 : 第7章 土の塑性力学, 土質力学(最上武雄編著), 土木学会監修, 技報堂, pp.834-843, 1969.
- 8) 土質工学ハンドブック, 第16章 杭基礎, 土質工学会, pp.552-554, 1982.
- 9) Vesic, A. S. : Expansion of cavities in infinite soil mass, *J. Soil Mechanics and Foundation Div. ASCE*, Vol.98, SM3, pp.265-290, 1972.
- 10) 山口柏樹 : 無限土中における空洞押し広げの弾塑性解析と応用, 東京工業大学土木工学科研究報告, No.15, pp.1-11, 1973.
- 11) 支持力入門 : 第2章 予測できるか支持力の限界(極限支持力の理論), pp.98-73, 地盤工学会, 1990.
- 12) Meyerhof, G. G. : The ultimate bearing capacity of foundations, *Géotechnique*, Vol. II-4, pp.301-332, 1951.
- 13) Koumoto, T. : Ultimate bearing capacity of cones in sand, *Penetration Testing 1988, ISOPT-1, Vol.2*, pp.809-813, 1988.
- 14) 甲本達也, 加来研 : 鋭敏性粘土地盤におけるコーン支持力の理論的解析, 土質工学会論文報告集, Vol. 24, No.2, pp.145-152, 1984.
- 15) Terzaghi, K. : Theoretical soil mechanics, John Wiley and Sons, INC., 1965.
- 16) Potyondy, J. G. : Skin friction between various soils and construction materials, *Géotechnique*, Vol.12, pp.339-353, 1961.
- 17) 勝見雅 : 中間主応力に注目した円形剛基礎の支持力に関する研究, 土木学会論文報告集, 第252号, pp.73-85, 1976.
- 18) Durgunoglu, H. T. and Mitchell, J. K. : Static penetration resistance of soils : I - Analysis, *Proc. ASCE, Spec. Conf. on In situ Measurement of Soil Properties*, ASCE, Vol.1, pp.151-171, 1975.
- 19) Robertson, P. K. and Campanella, R. G. : Interpretation of cone penetration test. Part I : Sand, *Canadian Geotechnical J.*, Vol.20, pp.718-733, 1983.
- 20) 広瀬誠, 砂の相対密度測定法小委員会 : 相対密度測定法の現状と一斉試験結果, 第12回土質工学研究発表講演集, D-3, pp.165-168, 1977.
- 21) 地盤調査法, 第6編 サウンディング(第7章 電気式静的コーン貫入試験), 地盤工学会, pp.233-241, 1995.
- 22) 甲本達也 : 静的コーン貫入試験のメカニズム, 土と基礎, Vol.47, No.9, pp.9-12, 1998.
- 23) Robertson, P. K. and Campanella, R. G. : Interpretation of cone penetration test. Part II : Clay, *Canadian Geotechnical J.*, Vol.20, pp.734-745, 1983.
- 24) Yu, H. S. and Mitchell, J.K. : Analysis of cone resistance : Review of Methods, *J. Geotech. and Geoenvironmental Engrg.*, ASCE, Vol.124, No.2, pp.140-149, 1998.
- 25) Miura, S., Toki, S. and Tanizawa, F. : cone penetration characteristics and its correlation to static and cyclic deformation-strength behaviors of anisotropies sand, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.2, pp.58-74, 1984.
- 26) 土質試験の方法と解説(第一回改訂版), 第3章 締固めた土のコーン指数試験, 地盤工学会, pp.266-273, 2000.

(2001.6.4 受付)

THEORETICAL ANALYSIS OF CPT AND A PROPOSAL OF AN IDEA FOR ESTIMATING STRENGTH PARAMETERS

Taizo KOBAYASHI, Ryoichi FUKAGAWA and Tsutomu MATSUURA

This paper deals with the method of characteristics established as a direct method of solving cone resistance in c - ϕ soil. The bearing capacity of cones was analyzed under the condition of axial-symmetry obeying the Mohr-Coulomb failure criterion, considering cone roughness and the intermediate principal stress. The results of the analysis are represented in contour of the bearing capacity related to both cohesion and friction angle. In this paper, as an application of the theoretical analysis, an idea for estimating c and ϕ simultaneously by using two types of cone which has different tip angle was proposed.